第 38 卷第 3 期 生 态 学 报 Vol.38,No.3
2018 年 2 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611242398
杨思遥,孟丹,李小娟,吴新玲.华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应.生态学报,2018,38(3):1028-1039.
Yang S Y, Meng D, Li X J, Wu X L.Multi-scale responses of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in North China in 2001—2014.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1028-1039.

华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应

杨思遥,孟　丹*,李小娟,吴新玲
1 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京　100048
2 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京　100048
3 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京　100048

摘要:近年降水量的减少以及全球气候变暖的影响导致我国华北区域干旱程度加剧,影响植被生长状况,使得区域生态环境恶化。基于华北地区 2001—2014 年的 TRMM 及 MODIS 数据,以归一化植被指数 NDVI、净初级生产力 NPP、植被状态指数 VCI 作为植被状况表征指数,以标准化降水蒸散指数 SPEI 作为气象干旱表征指数,对华北地区近年的气象干旱及植被状况时空变化进行评价,并分析植被对干旱的多尺度响应。结果表明:(1)华北地区干旱在西南部地区呈明显加重趋势,东北部地区干旱状况有所好转;针对不同时间尺度的 SPEI 表示干旱的变化趋势,得出月份尺度干旱呈现干湿交替特征,选取 SPEI 时间尺度越长,干旱化趋势越明显;(2)NDVI 与 NPP 所反馈的植被长势空间分布略有差异,总体而言华北地区植被状况大部分地区呈好转趋势,但研究区中部部分地区及部分沿海地区植被状况转差;(3)植被状况指数与 SPEI 指数在大部分地区呈正相关,NPP 与 SPEI 的相关性强于 NDVI 与 SPEI 的相关性,且相关程度在草原地区及中高海拔地区最高,林地对干旱的敏感度最弱;各植被类型在植被生长季的多数月份对 SPEI-3 响应最明显,且在夏季相关程度最高,夏季及其前期的季尺度干旱更易影响植被生长状况,SPEI-12 对植被的影响主要表现为影响植被生长季初期的植被状态。

关键词:华北地区;干旱;SPEI;植被变化;多尺度

Multi-scale responses of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in North China in 2001—2014

YANG Siyao, MENG Dan*, LI Xiaojuan, WU Xinling
1 *Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling Capital Normal University*, *Beijing* 100048, *China*
2 *Key Laboratory of Resource*, *Environment and Geographic Information System in Beijing*, *Beijing* 100048, *China*
3 *College of Resources Environment and Tourism*, *Capital Normal University*, *Beijing* 100048, *China*

Abstract: In recent years, the decrease in precipitation and the effect of global warming have resulted in the increase in the degree of drought in the North China, affecting vegetation growth, and leading to the deterioration of the regional ecological environment. In this paper, based on the data of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) and MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI) was extracted to characterize meteorological drought status, while Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Net Primary Production (NPP), and Vegetation Condition Index (VCI) were used to characterize the vegetation status. Temporal and spatial variation of meteorological drought and vegetation, as well as the multi-scale response of vegetation changes relative to meteorological

基金项目:北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201310028011)
收稿日期:2016-11-24;　　**网络出版日期**:2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: mengdan@ cnu.edu.cn

drought index in North China during 2001—2014 were comprehensive examined. The results indicated that drought showed a increasing trend in the southwestern region, whereas a decreasing trend in the northeastern region of North China. There were drought and wet alternating characteristics by month scale SPEI, and with the increase of time scale, a more obvious trend of drought characterized by SPEI were observed. In addition, the spatial distribution trends of NDVI and NPP in North China were slightly different, but generally, vegetation conditions have been improved in North China, while deteriorated in the central and coastal areas. Finally, the vegetation condition index were positively correlated with SPEI in most areas of North China. The degree of correlation was high in the grassland areas and middle-high altitude areas, whereas the response of forest land to drought was not sensitive relatively. The response of each vegetation type to SPEI-3 was most obvious in vegetation growing season, especially in the summer, and SPEI-12 mainly affected the early growth stage during the vegetation growing season. The results of meteorological drought on vegetation would assists on drought research in north China.

Key Words: North China; drought; SPEI; vegetation changes; multi-scale

植被是全球地表覆盖的重要组成,植被变化对气候环境变化的响应是研究全球或区域地表覆盖变化研究的重要内容,植被对生态环境的变化具有指示作用,也是干旱影响程度的重要反馈。干旱是因水分亏缺造成的一种气象灾害,引起水资源短缺、地下水储量锐减、农作物大面积减产等问题,相对其他的自然灾害,干旱的持续时间长,影响范围广,持续的干旱甚至造成严重的社会经济问题,影响人们的生活生产。干旱在我国每年都有发生,并且近年来干旱的范围程度都有增加的趋势[1-2],降水的减少和温度升高是导致干旱加剧的重要原因之一,是尤其对于水资源相对匮乏的北方地区。

华北地区属于半湿润地区,该地区具有下垫面复杂多样、地表植被稀疏和对气候变化的响应敏感等特点,是受全球气候变化影响最显著的地区之一[3],因此本文选取华北地区对植被状况对干旱程度的响应进行探讨。同时,干旱对植被的影响也因不同植被不同区域而有所差异[4],不同季节植被的需水量也存在差别[5],因此需要从更细致的时空尺度研究两者的关联。

干旱程度往往通过干旱指数定量评价,在以往的研究中,采用气象站点数据计算干旱指数的居多,常用的干旱指数有:标准化降水指数[6]、Palmer 干旱指数[7]、标准化降水蒸发指数[8]等。近年来有研究应用气象站点数据并通过 SPEI 指数对我国及区域的气象干旱变化趋势进行评价,发现我国普遍存在干旱化的趋势[9-10]。亦有研究对植被覆盖度、归一化植被指数(NDVI)等对降水、气温等要素的相关性以及时间滞后性进行了验证[11-12],但仍需考虑植被对综合干旱环境响应,已有的干旱植被响应方面的研究或基于单次干旱事件以及基于气象站点或基于年尺度 NDVI 研究较多[13-15],干旱监测数据的时空分布及密度也会影响研究的结果,气象站点覆盖范围有限,考虑到遥感数据较传统数据的易获取、大范围观测、空间连续、人为因素干扰小等优势,因此本次研究在数据源上选用 TRMM 及 MODIS 遥感数据,干旱指数上选用多时间尺度且综合降水及潜在蒸散的标准化降水蒸发指数(SPEI),分析华北地区 2001—2014 年间干旱的空间分布及时空演变,有助于华北区域后续的科学研究,也为其他区域基于遥感数据的干旱监测研究提供参考。在植被对气候环境响应方面,以往的研究考虑单一气象因子的研究较多,但植被变化及其对干旱的响应也应从不同植被差异及多时空尺度考虑。因此,本次研究选取年尺度的植被指标 NDVI 及净初级生产力(NPP),月尺度的植被指标植被状态指数(VCI),与多时间尺度 SPEI 通过计算相关系数的方法评价植被对干旱的响应,并分析不同植被覆盖类型对不同时间尺度干旱的响应。

1　研究区概况

对于华北地区的定义,不同文献中对华北地区范围的选取略有差异。依据行政区划的范围,以及我国降水量的分布特点,本次研究选取的华北地区包括北京、河北、天津、山西、山东、河南,共 6 个省市(图 1)。华北

地区属于半湿润区,年降水量位于 400—800mm 之间,年内降水分布不均,主要集中在夏季。从流域上来看,该区域位于黄河、淮河、海河三大流域之间。属于温带半湿润大陆性气候。华北地区的北部及西部地区为山区,植被类型以林地、草原为主,中部及东部地区为大面积平原,是我国主要的农作物区。

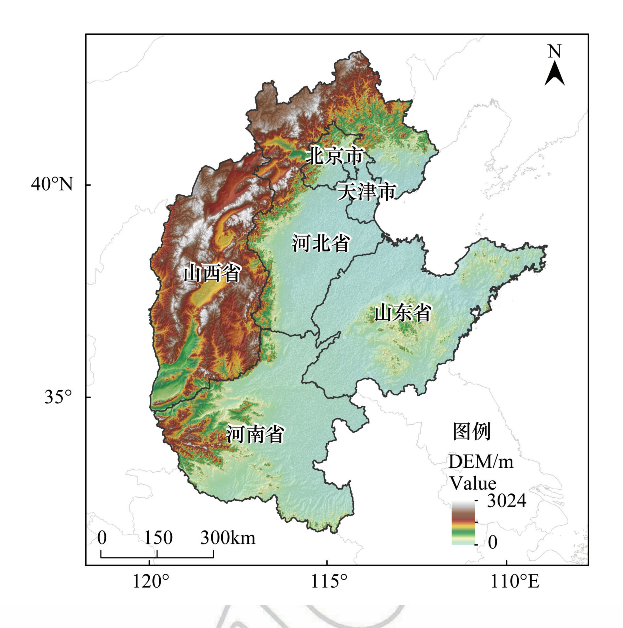


图 1 研究区概况图

Fig.1 General situation of study area

2 研究方法及数据

2.1 干旱监测指标——SPEI

本次研究中选用标准化降水蒸发指数 SPEI 作为干旱监测指标,单独的降水或温度因子难以全面的描述气候干湿状况,SPEI 指数既具有 SPI 指数的多时间尺度特征,在考虑降水的同时考虑潜在蒸散发的影响作用。已有研究对 SPEI 指数在中国地区的适用性分析[16-17],并认为该指数在本次研究地区的应用是可靠的。SPEI 指数由 Vicente-Serrano 等提出。计算方法如下:

(1)逐月计算降水量与潜在蒸发量的差值 $D_i=P_i-\mathrm{PET}_i$其中:i 为月份。

(2)建立不同时间尺度的水分盈亏累积序列,并计算其概率分布。

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}),\ n \geqslant k \tag{1}$$

式中:k 为时间尺度(月),在本次研究中,k 分别取 1、3、6、9、12;n 表示某个月。

(3)对 D_n^k 数据序列进行拟合及正态化,得到 SPEI 数值。Vicente-Serrano 通过对比表明 Log-logistic 分布对 D_n^k 数据序列的拟合效果最好。三参数的 Log-logistic 概率密度函数表达式为:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \tag{2}$$

式中:α、β、γ 分别为尺度、形状和起始参数。拟合参数的估计方法采用线性矩法。分别由以下公式计算:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{(6w_1 - w_0 - 6w_2)} \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+\frac{1}{\beta})\Gamma(1-\frac{1}{\beta})} \tag{4}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1+\frac{1}{\beta})\Gamma(1-\frac{1}{\beta}) \tag{5}$$

$$w_s = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left[1-\frac{l-0.35}{n}\right]^s X_l \tag{6}$$

式中:W_s是概率权重矩,$S=0,1,2$。l 是累积水分亏缺量序列 X 按升序排列($X1 \leqslant X2, \cdots, \leqslant Xn$)的序数。$\Gamma(\beta)$是 Gamma 函数。通过三参数 log-logistic 概率分布函数,可计算给定时间尺度的累积概率如下:

$$F(x) = \left[1+\left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{7}$$

对各月累积水分亏缺量序列的概率分布 $F(x)$进行标准化处理,令 $P=1-F(x)$:

当 $P \leqslant 0.5$ 时,参数 $W=\sqrt{-2\ln P}$:

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \tag{8}$$

当 $P>0.5$ 时,$W = \sqrt{-2ln(1-P)}$:

$$SPEI = \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} - W \tag{9}$$

式中:$c_0 = 2.515517$,$c_1 = 0.802853$,$c_2 = 0.010328$,$d_1 = 1.432788$,$d_2 = 0.189269$,$d_3 = 0.001308$。

根据 SPEI 指数的数值划分不同干旱等级,如表 1。

表 1　基于 SPEI 指数的干旱等级划分[18]

Table 1　SPEI grade standard of drought

SPEI 数值范围 SPEI range	干旱等级 Drought level	SPEI 数值范围 SPEI range	干旱等级 Drought level
0<SPEI	无干旱	-2<SPEI≤-1.5	严重干旱
-1<SPEI≤0	轻度干旱	SPEI≤-2	极端干旱
-1.5<SPEI≤-1	中度干旱		

SPEI: 标准化降水蒸发指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

SPEI 指数数值越小表示越干旱,以往的 SPEI 指数均采用气象站点资料计算,但气象站点观测资料存在分布密度低且时空分布不均的问题,而观测数据的密度以及其时空分布的合理性也是影响干旱监测结果准确性的关键。因此本次研究采用 TRMM 及 MODIS 数据作为数据源计算,基于遥感数据计算得到 SPEI 指数具有更均匀的空间分布。

热带降雨测量卫星 TRMM 数据在我国具有较好的适用性,与实测站点数据对比具有明显的线性相关性且通过 99%的显著性检验[19-20],所以本研究降水资料选用 TRMM3B43 月降水数据集(http://trmm.gsfc.nasa.gov/),数据版本为 7A/7,数据覆盖范围为全球范围南北纬 50°之间,空间分辨率为 0.25°×0.25°,数据单位为 mm/h,通过预处理将数据单位转化为 mm/月。TRMM3B43 数据融合多个微波遥感数据,具有大范围且时间连续观测的优势,为气象干旱的监测提供了一条新途径。

潜在蒸散资料来自 MODIS 数据中 MOD16A2 月合成数据集(http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16),该数据蒸散算法基于 Penman-Monteith 算法估算,该算法较 Thornthwaite 更为精确。选用 0.5°×0.5°分辨率数据,通过双线性内插法重采样为 0.25°×0.25°分辨率,以便保持和 TRMM 降水数据分辨率的一致,同作为标准化降水蒸散指数(SPEI)计算的输入数据。

本次研究计算得到的 SPEI 指数包含的时间段为 2001 年 1 月至 2014 年 12 月,共计 168 个月的栅格数据。

2.2　植被状态监测指标

2.2.1　归一化植被指数 NDVI

归一化植被指数 NDVI 是目前应用最广泛的植被指数,可以反映植被的覆盖度、植被的基本生长状态等。由于干旱对植被生长状况的影响主要表现在植被生长季,而华北地区的植被、作物等生长季主要在每年的 4—10 月,该时段植被开始呈现出明显的绿色。因此选取研究时间内每年该时间段的数据分析。

本研究中 NDVI 数据来自第六版 MOD13A3 数据集(https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html),为月 NDVI 合成数据,空间分辨率为 1km×1km。研究区华北地区需要图幅号如下的 4 幅影像拼接:h26v04、h26v05、h27v04、h27v05。

2.2.2　净初级生产力 NPP

陆地植被净初级生产力 NPP 指单位时间、单位面积上植被通过光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余成分。作为植被生态系统中物质、能量的转换和传递基础,直接反映了植被在自然条件下自

身的生产能力,同时也能够有效地响应气候与环境变化[21]。

净初级生产力 NPP 数据来自 MOD17A3 数据集(http://www.ntsg.umt.edu/project/mod17),为全年植被净初级生产力,数据空间分辨率为 1km×1km。由于 NPP 在大范围实测数据获取困难,所以各研究均采用模型模拟,MOD17A3 数据集利用 BIOME-BGC 模型与光能利用模型建立的 NPP 估算模型模拟得到,与传统回归模型相比,基于更多的参数和更精密的估算方法,具有更高的估算精度[22]。

2.2.3 植被状态指数 VCI

VCI 指数[23]通过对某年某月的 NDVI 与研究时间段内所有年份同月的 NDVI 最大最小值归一化得到,反应月植被生长的综合状况。对多年 NDVI 归一化得到的 VCI 指数可以作为植被受环境胁迫程度的指标,描述植被时空变化,被广泛应用于农业旱情监测等领域。具体的计算公式如下:

$$\mathrm{VCI}=100\,\frac{(\mathrm{NDVI}_{ijk}-\mathrm{NDVI}_{(\min)ij})}{(\mathrm{NDVI}_{(\max)ij}-\mathrm{NDVI}_{(\min)ij})} \tag{10}$$

式中:$\mathrm{NDVI}_{(\max)}$和 $\mathrm{NDVI}_{(\min)}$代表同月同像元 NDVI 的最大值和最小值,最大值最小值同样按月统计以消除季节影响,i、j、k 分别代表像元、月、年。

2.3 时空变化分析

2.3.1 线性变化趋势

通过一元线性回归计算 SPEI 以及 NDVI、NPP、VCI 的变化斜率,计算公式如下:

$$\theta_{\mathrm{slope}}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times M_{\mathrm{SPEI}_i})-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}M_{\mathrm{SPEI}_i}}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{11}$$

式中:以计算 SPEI 的月线性变化斜率为例,n 为总月份数,$M_{\mathrm{SPEI}i}$ 为第 i 月的 SPEI 值。

2.3.2 相关系数分析

通过常用的相关系数 R 的计算,可以分别得到 SPEI 指数与 NDVI、NPP、VCI 的线性相关程度,以便分析植被生长状况对干旱程度的响应。相关系数的计算公式为:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{12}$$

3 结果与分析

3.1 华北地区干旱时空变化特征

SPEI 指数具有多时间尺度的优势,分别计算得到 1、3、6、9、12 个月尺度的 SPEI 数据集,并在华北地区统计均值,得到多时间尺度上华北地区气象干旱程度在 2001—2014 年时间序列的变化趋势。结果显示,从研究区均值上来看,不同时间尺度的 SPEI 指数均表示华北地区的干旱程度呈逐渐加重的变化趋势,选取的时间尺度越长,时间序列曲线波动越小,干湿交替变化周期加长,干旱化趋势的显著性加大,SPEI-1、SPEI-3 月均值的变化趋势通过 α=0.05 的显著性检验,SPEI-6、SPEI-9、SPEI-12 月均值的变化趋势通过 α=0.01 的显著性检验。不同时间尺度的 SPEI 所反映的气象干旱变化的程度有所差异,但总体上其变化的方向性是一致的,主要由于选取不同的时间尺度不改变原始数据及拟合的方式,但更长的时间步长可以弱化单月水平衡之间的差异,而突出季尺度、年尺度等的特征。SPEI-1 通常用来反映短期地表水分异常;SPEI-3 可反映干旱的季节变化,并分别选取 2 月、5 月、8 月、11 月的 SPEI 作为冬、春、夏、秋季的干旱状况反映,以同时间段计算,4 个季节中秋季干旱的变化趋势最平稳,春季干旱加重趋势最明显,其次为冬季、夏季;SPEI-12 用来反映干旱的年变化趋势。

通过线性趋势分析计算不同时间尺度的 SPEI 变化斜率,得到 SPEI 在不同区域的干湿变化状况,数值为负表示区域在 2001 年至 2014 年间呈干旱化趋势,且数值越小表示干旱化程度越严重。从变化斜率的空间分布上来看,随着时间尺度的增加,不同区域干旱化或湿润化的程度均有所加大。从干旱化区域占比及干旱化趋势的显著性来看,SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-9、SPEI-12 指数分别显示面积占 96%、83%、78%、72%、71%的区域线性变化斜率小于 0,表示为呈干旱化的区域,并且在干旱化的区域范围内,其中上述 SPEI 指数分别占 44%、51%、64%、69%、71%的区域的干旱化趋势达到 $\alpha=0.05$ 显著性水平。总体上,不同时间尺度的 SPEI 变化规律表现一致,呈现一致的空间分布特征,以 SPEI-6 变化趋势的空间分布图为例(图 2),干旱化程度自西南向东北逐渐减弱,干旱化最明显出现在河南省境内,湿润化区域则在河北省东北部。

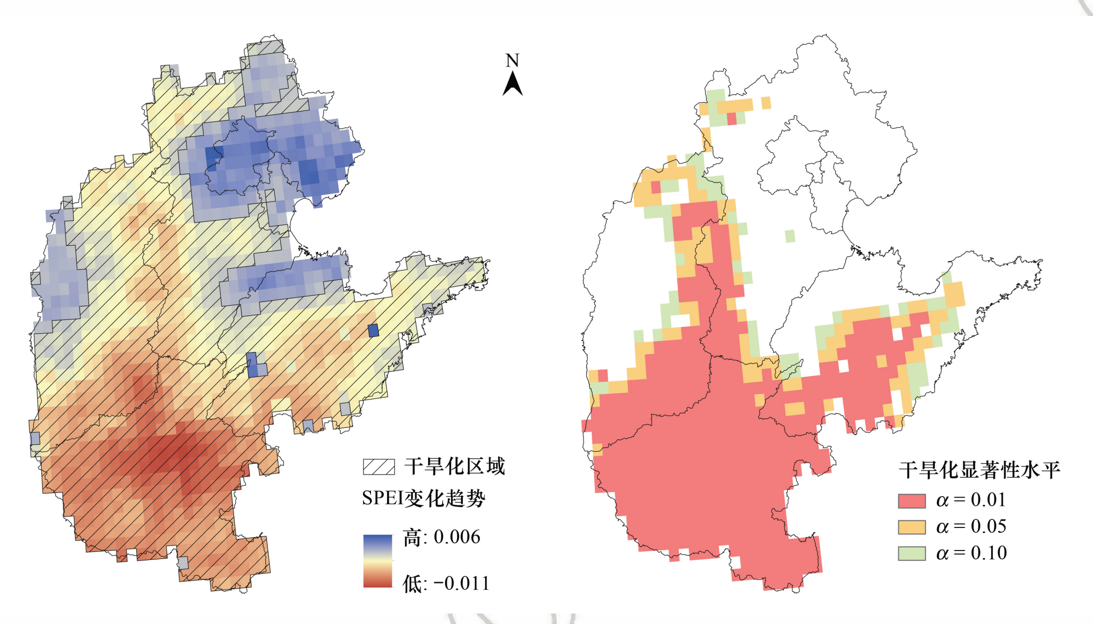


图 2　SPEI-6 月变化斜率空间分布显著干旱化区域

Fig.2　Spatial distribution of SPEI-6 variation trend Significant arid region

按照上述 SPEI 指数的等级划分标准,在统计范围的 168 个月内统计不同等级干旱在不同时间尺度下的干旱发生频次及空间分布。如图 3 所示,为不同时间尺度下重度干旱(SPEI≤-1.5)频次的空间分布:SPEI-1 反映一个月尺度的重度干旱主要分布在山西南部和华北东部沿海地区,这些地区易发生短期的水分平衡异常,其中山西南部地区虽然在一个月尺度干旱发生频次大,但干旱事件持续月份短,因此在中长时间尺度干旱(SPEI-3\6\9\12)中各程度干旱发生频次均不高,而华北东部沿海地区在中长期尺度中,重度干旱发生频率依然较高,说明该区域的干旱存在长期持续性。河南省大部分地区单月干旱程度为中度,但容易连续,在长时间尺度上形成严重干旱。

3.2　华北地区植被时空变化特征

利用每年植被生长季 NDVI 均值及年 NPP 数据(共计 14a),分析华北地区的植被年变化特征。从数据的年变化时间序列上来看,华北地区的 NDVI 及 NPP 总体均呈增长趋势,说明华北地区的植被生长状况总体呈好转趋势,NPP 数值年波动较 NDVI 明显。

从 NDVI 及 NPP 线性变化趋势的空间分布上来看(图 4),NDVI 均值年变化斜率大于 0 表示植被状况改善,这部分区域占 88%,NPP 变化斜率大于 0 区域占 71%,说明研究区大部分区域植被状况好转,主要分布在西部高海拔地区山西境内。在研究区南部河南省大部分地区 NDVI 及 NPP 均呈下降趋势,此外在河北东部沿海及山东小部分沿海区域植被状况转差,初步分析与该区域中长期干旱频率较高有关。在河北省中部靠近太行山沿线区域,NDVI 表现出明显下降趋势,而 NPP 在该区域则相对缓和,这部分主要为农作物种植区,人为影响较大,NPP 在研究区北部林地、草原区反映出植被状况转差趋势,该区域 NDVI 则不存在转差趋势。

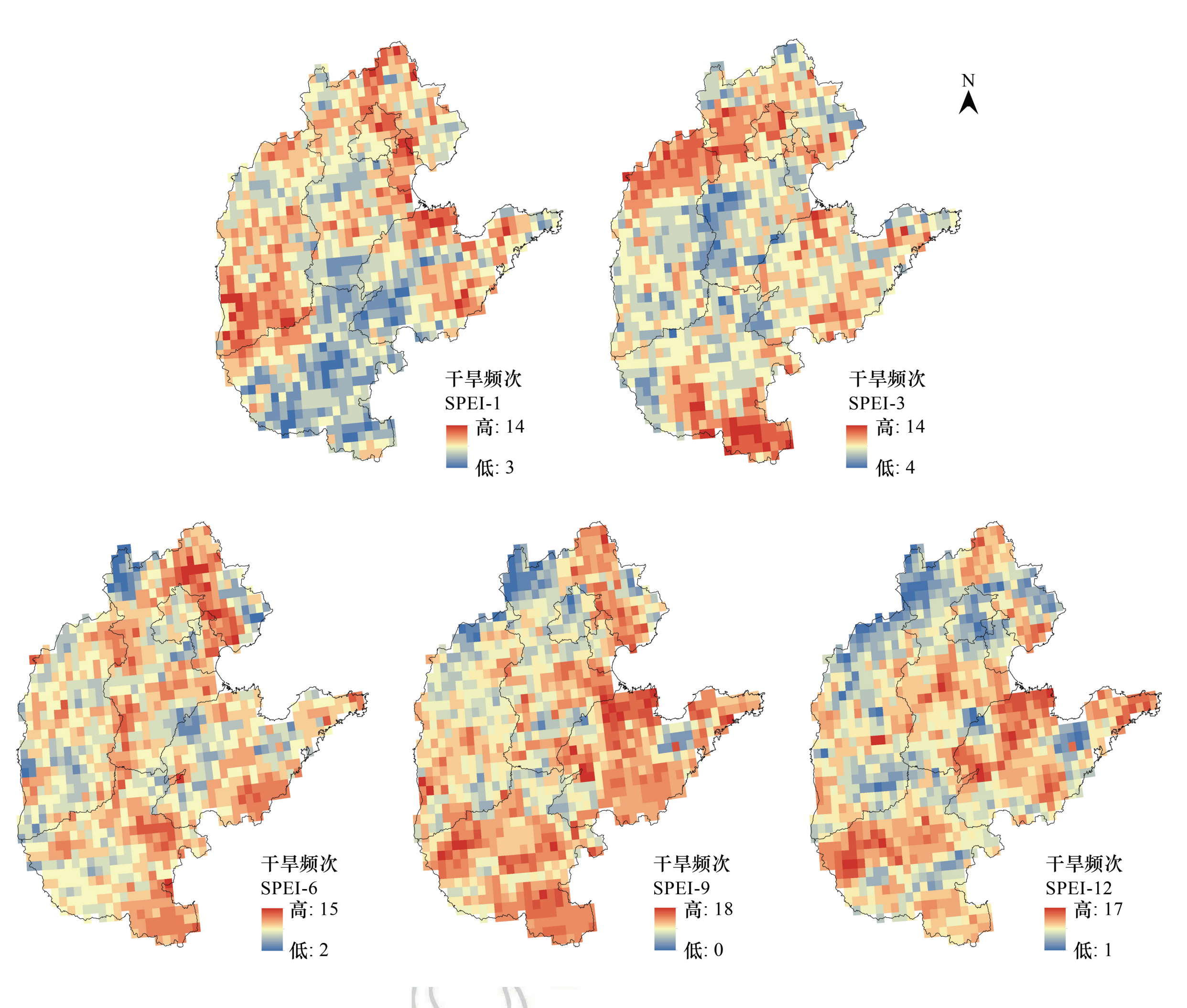


图 3 多尺度 SPEI 重度干旱频次空间分布

Fig.3 Spatial distribution of severe drought frequency in multi-scale SPEI

由于华北地区不同月份的植被长势差异较大,VCI 指数在不同月份不同区域间具有可比性,因此以 VCI 指数作为月际植被状况指标,并用于分析不同月份植被受干旱环境影响的差异。图 5 为华北地区植被生长季 VCI 指数的均值,结果显示华北地区近 15 年植被状况整体好转,与从 NDVI、NPP 得出的植被覆盖变化趋势结论一致,且在空间分布上与 NDVI 年变化趋势一致。各月份历年变化趋势同总体一致,均体现植被状况呈好转趋势。4 月份的 VCI 数值最低,其次为 10 月、5 月、6 月,以上月份历年 VCI 月均值均低于 50,究其原因,华北地区春秋两季降水量小且潜在蒸发大,受两者综合影响,易导致春旱及秋旱的发生,从反映季尺度干旱的 SPEI-3 指数来看,虽然各月份干旱发生的频率相差不大,但春秋两季发生干旱的月份的干旱程度相对夏季更大,植被受其影响导致春秋季 VCI 指数偏低。

3.3 华北地区植被对干旱环境的响应

3.3.1 华北地区年植被状况对年干旱的响应

分别选取每年的 NDVI(通过历年植被生长季月 NDVI 数据均值合成)及 NPP 数据,通过相关系数分析植被状况与年干旱状况的相关性。考虑到 SPEI-12 为年尺度指数,可反映年际气象干旱状况,因此选取 SPEI-12 数据作为年干旱状况表征指标,并重采样为 1km×1km 空间分辨率,分别计算 SPEI-12 与 NDVI 及 NPP 基于空间象元的相关系数。

NDVI 反映植被绿度、植被覆盖、植被长势等状态。从结果来看,NDVI 指数的数值会受到气候环境、水分平衡等影响而发生改变,总体来说更湿润的气候与适宜的温度有利于植被的生长,74%的区域 NDVI 与 SPEI

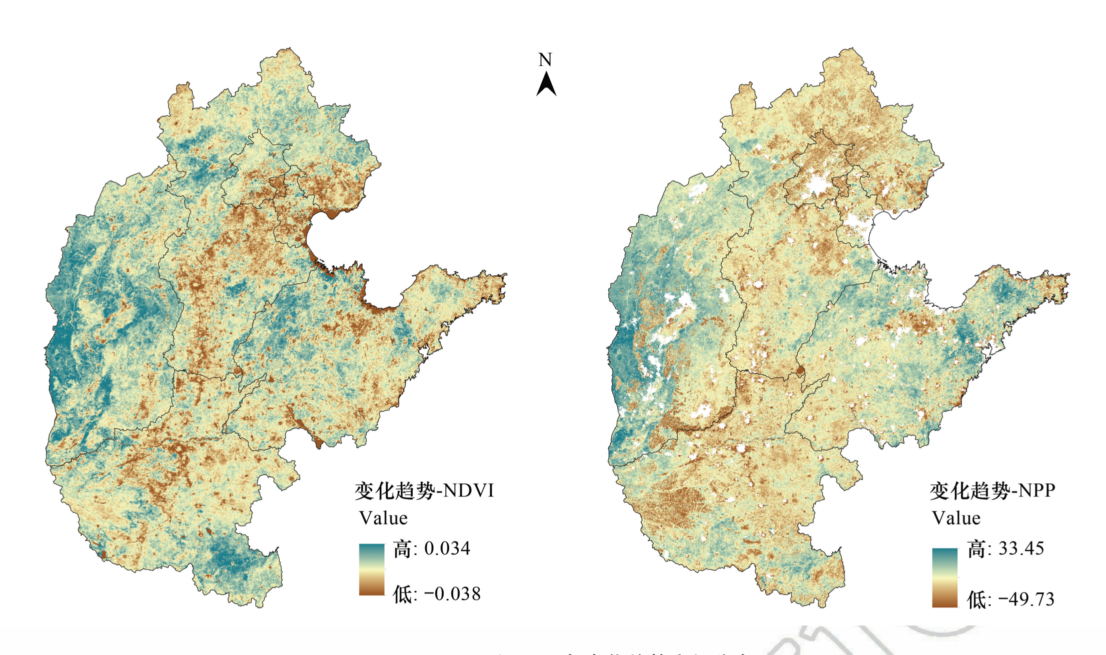


图 4　NDVI 和 NPP 年变化趋势空间分布

Fig.4　Spatial distribution of NDVI and NPP annual variation trend

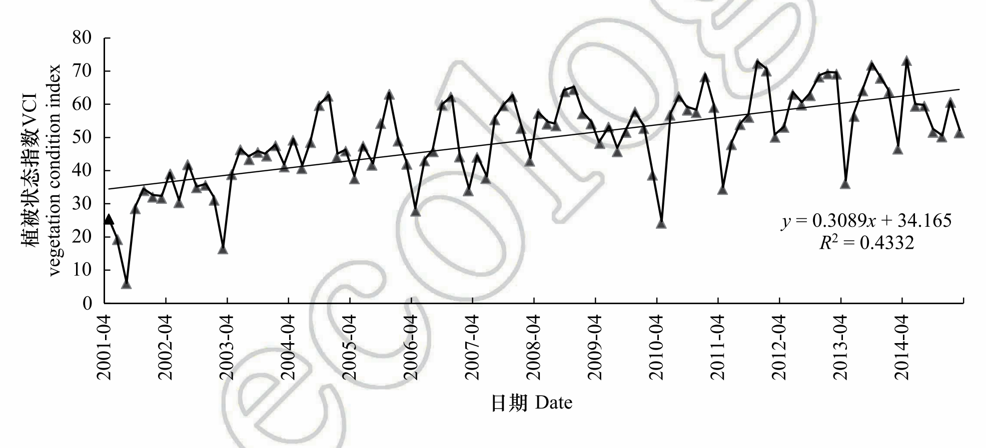


图 5　华北植被生长季 VCI 指数时间变化

Fig.5　Temporal variation trend of VCI index of vegetation growing season in North China

的相关系数为正,正相关区域均值为 0.28,其中 9%区域达到 α=0.05 显著性水平,17%区域达到 α=0.1 显著性水平。但对不同区域来说,相关程度差异较大。两者相关系数较高区域主要分布在河北北部及西部地区,河北、山西交界处,以及河南中部及山东中部海拔较高地区。考虑不同植被覆盖类型的影响,根据 MCD12Q1 的 IGBP 全球土地覆盖分类方案,并进行汇总重分类成 8 类(图 6),重分类方案见表 2,本文着重分析林地、草原、灌丛、农田 4 类土地覆盖类型对干旱的响应,统计得出 4 类覆盖类型的 NDVI 与 SPEI 正相关系数均值,草原地区最高为 0.32,其次为灌丛 0.30、农田 0.27、林地 0.26。

NPP 反映植被生长发育的能力,是碳平衡的重要指标。从计算结果来看,如图 7,90%区域 NPP 与 SPEI 的相关系数为正,正相关区域均值为 0.37,其中 17%区域达到 α=0.05 显著性水平,32%区域达到 α=0.1 显著性水平。不同土地覆盖类型两者间正相关系数均值从高到低分别为草地 0.37、农田 0.36、灌丛 0.34、林地 0.34,与 NDVI 与 SPEI 的相关性对比,研究区最北部地区的相关性有所弱化,研究区中部农作物区的相关性有所增强。

与 NDVI 对干旱的响应相比,NPP 对干旱的响应更明显,但均表现为草地对干旱的敏感度最强,林地对干旱的响应较迟缓,因此在旱情监测中,应更关注草地生长状况的指示作用,及时采取抗旱措施防止旱情进一步蔓延。

表 2 土地覆盖/土地利用重分类

Table 2 Land cover/land use classification

国际地圈生物圈计划土地覆盖分类方案 International Geosphere-Biosphere Program (IGBP) land use classification	重分类后类别 Land use reclassification	国际地圈生物圈计划土地覆盖分类方案 International Geosphere-Biosphere Program (IGBP) land use classification	重分类后类别 Land use reclassification
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	林地	作物 Croplands	农田
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest		作物和自然植被混交地 Cropland-natural vegetation mosaic	
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest		冰雪 Snow and Ice	水体
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest		水体 Water bodies	
混交林 Mixed forests		永久湿地 Permanent Wetlands	湿地
郁闭灌丛 Closed shrublands 开放灌丛 Open shrublands	灌丛	城市 Urban areas	城市
多树的草原 Woody savannas 稀树的草原 Savannas 草原 Grasslands	草原	裸地 Barren or sparsely vegetated	裸地

3.3.2 华北地区月植被状况对多尺度干旱的响应

为研究干旱对植被生长影响的时间滞后性,基于月尺度分析植被状况对多尺度气象干旱的响应。从时间序列的线性相关性考虑,基于 1km×1km 空间像元,以 VCI 指数表征月植被状况,并与其对应像元的 1、3、6、9、12 个月尺度 SPEI 指数进行基于空间像元的相关分析,分别得到 VCI 指数与以上 5 种时间尺度 SPEI 的相关系数分布图。

从相关系数的空间分布上来看,选择不同时间尺度差异不大,与基于年尺度得到的 NDVI 与 SPEI 之间相关系数空间分布特征大体一致,较高的相关系数更多分布在海拔较高区域,以研究区北部地区为主。VCI 与 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-9、SPEI-12 相关系数为正值部分占区域总面积依次为 86%、90%、78%、71%、74%,其中达到 $\alpha=0.01$ 显著性水平所占面积依次为 6%、33%、19%、22%、24%。总体来说植被对气象干旱的响应在 3 个月尺度最明显,即对季尺度响应最明显。为探究不同植被类型对 SPEI 响应时间尺度的差异,仍采用上述植被分类方案,分别统计 VCI 与 5 种时间尺度 SPEI 指数相关系数的均值。结果显示 4 种植被类型均与 SPEI-3 相关系数最大,说明过去 3 个月累积干旱影响更易作用于当月植被状况。

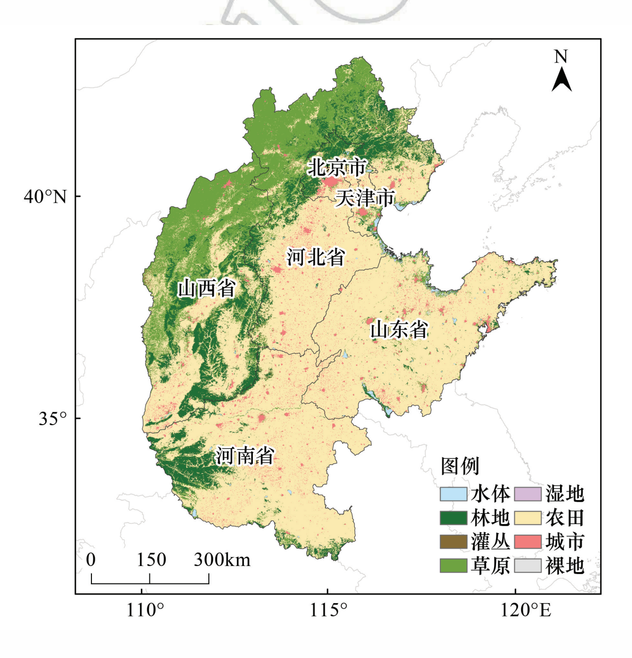


图 6 研究区土地覆盖/土地利用图

Fig.6 Land cover/Land use map of the study area

同种植被在其生长季的不同月份,对气象干旱响应的时间尺度及程度也会存在差异,因此,计算历年同月 VCI 指数对应 5 种 SPEI 指数的相关系数,通过计算得到 35 幅(4—10 月 VCI,SPEI5 个时间尺度)相关系数结果;分析各月份 4 种不同土地覆盖类型受 SPEI 指数影响最大的时间尺度。结果见表 3,例如 7 月-草原对应 3 (0.43)代表 7 月的草原植被类型对 SPEI-3 响应最明显,相关系数为 0.43。结果显示在多数月份植被对 SPEI-3 响应最明显,且在夏季(8 月及 9 月)这种趋势更为普遍。而植被状况表现为对较长时间尺度的干旱(SPEI-12)响应更明显的现象则主要出现在 4 月至 6 月,这期间的林地、灌丛、草原均不同程度的受到年尺度干旱影响,说明较长时间尺度的干旱倾向于影响植被生长季初期的植被状况。从相关系数的数值大小来看,不同植被类型均在夏季对干旱响应最明显,林地在多数月份受干旱影响较弱,但在 9 月相关系数有明显提升,灌丛及

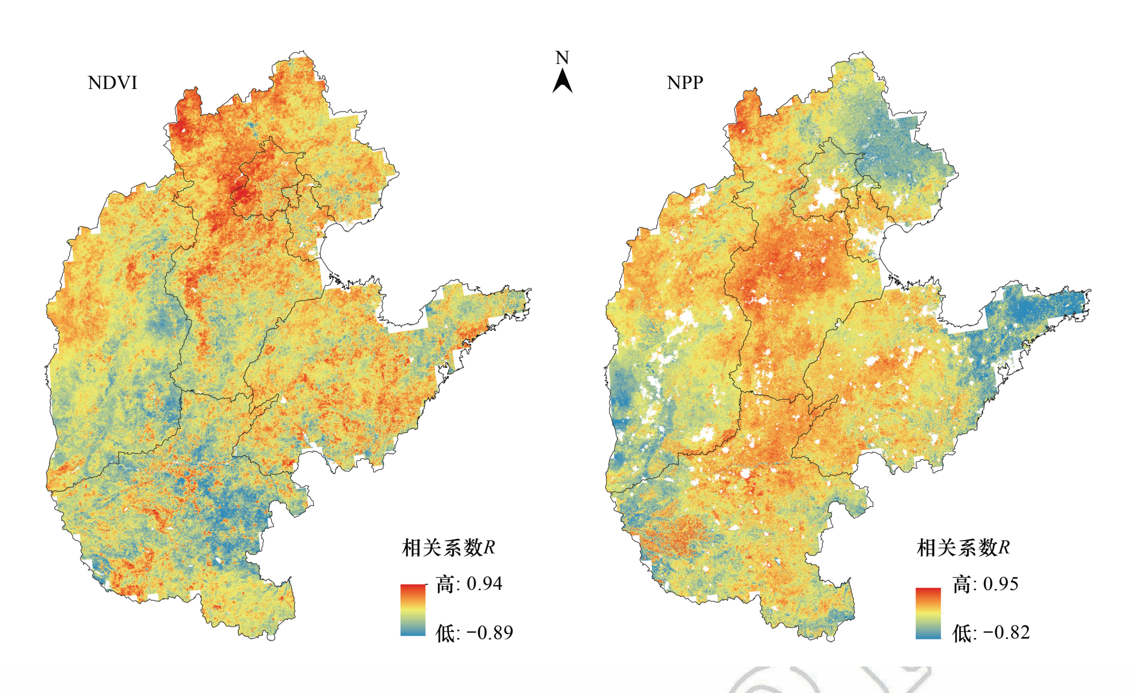


图 7　华北地区年 NDVI 和 NPP 与 SPEI-12 相关系数空间分布

Fig.7　Spatial distribution of correlation coefficient of NDVI and NPP to SPEI-12 in North China

草原在 7 月至 9 月对干旱的响应最好,农田则在 7 月至 8 月对 SPEI 的响应达到最大,随后下降。

表 3　各月份不同植被类型 VCI 对 SPEI 最大响应的时间尺度

Table 3　The maximum time scale of the response degree of VCI to SPEI in different vegetation types and different month (correlation coefficient in brackets)

植被类型 Vegetation types	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
林地 Woodland	12(0.10)	3(0.18)	3(0.12)	1(0.22)	3(0.21)	3(0.35)	9(0.19)
灌丛 Shrub	1(0.22)	12(0.22)	12(0.25)	3(0.34)	3(0.35)	3(0.40)	12(0.17)
草原 Grassland	12(0.22)	12(0.33)	3(0.29)	3(0.43)	3(0.43)	3(0.42)	3(0.29)
农田 Farmland	1(0.16)	3(0.11)	3(0.12)	3(0.23)	3(0.26)	3(0.20)	3(0.18)

括号内为相关系数

逐月计算 VCI 与 SPEI 间相关系数,用于探究月气候环境差异对植被干旱响应的影响作用。上述研究显示 VCI 普遍对 SPEI-3 或 SPEI-12 响应最明显,因此基于这两种时间尺度分析。

从各月份的干湿状况来看,在越干旱的月份,植被状况越易受到干旱环境的影响,反映为 VCI 响应程度的加大,对于 SPEI-3,其反应的干旱程度与 VCI 响应程度之间的相关系数为 0.21,对于 SPEI-12,该相关系数为 0.29,均为弱相关,说明月干旱程度是影响植被干旱响应程度的因子之一。

图 8 可见,VCI 与 SPEI-3 的相关系数在夏季 7、8 月达到最大,该季节的植被受季尺度干旱影响较其他月份更明显,春旱及初夏的干旱均会影响到夏季植被的生长状况;春季的 VCI 指数与 SPEI-12 相关系数更大,受过去一年的干旱环境影响更明显,说明季节性会影响植被对干旱的响应程度,但其影响会因干旱时间尺度的差异而有所区别。

为区分不同海拔及植被类型的影响,一方面根据 DEM 数据获取的海拔高度划分平原(DEM<200m)、山地(200m<DEM<1000m)、高山(DEM>1000m)3 种地貌类型,并且为避免样本数的影响,在每种地貌类型的采样点中各随机留下 100 个点;另一方面根据上述划分林地、灌丛、草原、农田 4 种植被类型,分析相关系数在不同区域的区别。对于 SPEI-3 及 SPEI-12,山地及高山地区的相关系数均好于平原地区,海拔较高的地区主要以林地草地覆盖为主,主要受自然环境影响,人为干涉较小,因此对气候环境变化更敏感;草原地表覆盖的相

关系数均好于林地及农田,在长时间尺度下,林地的相关系数高于农田,在短时间尺度下,春季农田的相关系数高于林地,秋季则为林地的相关系数高于农田,灌丛地表覆盖类型在各个月份的波动较大。林地植被根系发达,因此耐旱性较草地更好,而农田多分布在平原,人为干涉及活动也影响到植被状况对干旱的响应程度。

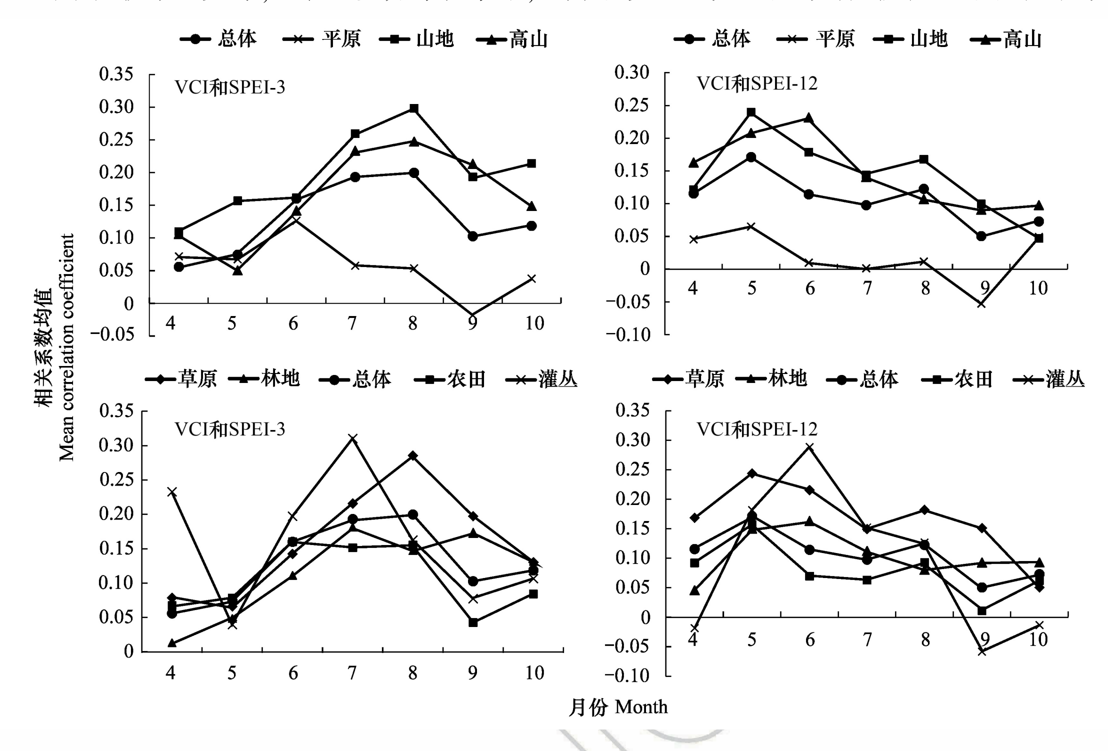


图 8 生长季各月份不同海拔植被状态指数 VCI 和 SPEI-3、SPEI-12 及不同土地覆盖类型 VCI 和 SPEI-3、SPEI-12 相关系数均值

Fig.8 Mean values of correlation coefficients of Vegetation Condition Index(VCI) to SPEI-3 / SPEI-12 in different elevation and VCI to SPEI-3 / SPEI-12 in different land cover

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)华北地区 2001—2014 年的 SPEI 指数反映月尺度干旱程度整体均值上呈波动态势、并且月尺度干旱化趋势通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。在更大的时间尺度下,干旱化趋势更明显,且春季干旱化趋势强于其他季节。从空间上来看,干旱化最严重的区域以研究区南部河南省境内及其周边为主,湿润化区域分布在研究区东北部。

(2)华北地区 2001—2014 年的 NDVI、NPP、VCI,3 种植被状况表征指数整体均值呈增加趋势,但在区域分布上与干旱状况表征指数 SPEI 具有一定的空间一致性。NDVI 变化斜率小于 0 区域在河北中部及东部沿海,河南中部及山东小部分地区,NPP 变化斜率小于 0 区域在河北中北部,河南大部分地区分布;SPEI 指数也反应干旱程度河北中部及山东沿海地区呈轻度加重趋势,在河南大部分地区干旱程度呈严重加重趋势。

(3)SPEI 与 NDVI、NPP、VCI 在大部分区域,均呈不同程度的正相关。在年尺度上,NPP 与 SPEI 的相关性强于 NDVI 与 SPEI 的相关性,但均表现为草地对干旱的响应的敏感程度最高,林地最弱,农田及灌丛居中。在月尺度上,不同类型的植被普遍对 SPEI-3 响应最敏感,受季尺度干旱影响最显著,且相关程度在夏季达到最高;表征年尺度干旱的 SPEI-12 与 4、5 月的 VCI 指数的相关系数最大,说明在植被生长季初期,植被对过去 1 年的气象干旱状况响应最明显。从不同海拔来看,山地及高山区的植被状况在多数月份对 SPEI 的响应明显高于平原区,山区植被受人类活动干扰小,更适合描述自然条件下的植被响应特征。

4.2 讨论

本文基于 TRMM 及 MODIS 遥感数据,对华北地区 2001—2014 年间多尺度气象干旱的变化以及植被状况

的变化进行评价,并主要分析植被对干旱的多尺度响应特征,以及不同植被类型对干旱响应程度的差异。更均匀的干旱指数格网的空间分布有利于从更细致的角度分析植被状况的干旱响应,也便于区域间差异的对比。

从 SPEI 分别与 NDVI、NPP、VCI 计算得到的相关系数并按植被类型统计的均值来看,均为正相关,但得到的相关系数的数值不是很高,一方面受均值统计影响,一方面不同植被类型在不同月份的差异也需细化,如林地类型中阔叶林与针叶林对 SPEI 的响应,在不同时间尺度下这种相关程度存在区别。研究得到的农田地物与月干旱指数的相关程度较低,这一方面与人为灌溉活动有关联,另一方面不同植被、农作物存在不同的生长周期,如华北地区的主要农作物,冬小麦、夏玉米、棉花、大豆等生长周期不同,在后续研究中还需区别考虑。

参考文献(References):

[1] 徐建文, 居辉, 刘勤, 杨建莹. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应. 生态学报, 2014, 34(2): 460-470.

[2] Wang L, Chen W. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. International Journal of Climatology, 2014, 34(6): 2059-2078.

[3] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 季明霞. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应. 干旱气象, 2013, 31(4): 641-649.

[4] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Begueria S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): 52-57.

[5] Jain S K, Keshri R, Goswami A, Sarkar A. Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for Rajasthan, India. Natural Hazards, 2010, 54(3): 643-656.

[6] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//AMS 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA: American Meteorological Society, 1993: 179-184.

[7] Palmer W C. Meteorological Drought. Research Paper No. 45. Washington, DC: U. S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965: 45-58.

[8] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[9] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 陈汇林, 陈珍莉. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.

[10] Yang M J, Yan D H, Yu Y D, Yang Z Y. SPEI-based spatiotemporal analysis of drought in Haihe river basin from 1961 to 2010. Advances in Meteorology, 2016, 2016: 7658015.

[11] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.

[12] 齐述华, 王长耀, 牛铮, 刘正军. 利用 NDVI 时间序列数据分析植被长势对气候因子的响应. 地理科学进展, 2004, 23(3): 91-99.

[13] 严建武, 陈报章, 房世峰, 张慧芳, 付东杰, 薛晔. 植被指数对旱灾的响应研究——以中国西南地区 2009 年—2010 年特大干旱为例. 遥感学报, 2012, 16(4): 720-737.

[14] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. 地理学报, 2015, 70(5): 717-729.

[15] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 钟睿达, 黄文炜. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186.

[16] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.

[17] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 熊光洁, 李邦东, 董文成, 王利盈. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625.

[18] 张岳军, 郝智文, 王雁, 李明明, 陈二萍, 李芬, 张永瑞. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1418-1424.

[19] 李景刚, 阮宏勋, 李纪人, 黄诗峰. TRMM 降水数据在气象干旱监测中的应用研究. 水文, 2010, 30(4): 43-46.

[20] 骆三, 苗峻峰, 牛涛, 魏春秀, 王霞. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析. 气象, 2011, 37(9): 1081-1090.

[21] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例. 地理学报, 2016, 71(1): 35-48.

[22] 崔林丽, 杜华强, 史军, 陈昭, 郭巍. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究. 地理科学, 2016, 36(5): 787-793.

[23] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405-1419.